

遥感信息应用于水分胁迫条件下的华北冬小麦生长模拟研究

张黎¹ 王石立^{1,*} 何延波² 马玉平¹ 庄立伟² 侯英雨^{2*}

(¹ 中国气象科学研究院, 北京 100081; ² 国家气象中心, 北京 100081)

摘要: 由于初始土壤水分、灌溉量等变量的空间分布不易获得, 区域尺度水分胁迫条件下作物生长模拟存在一定难度。本文在 WOFOST 模型本地化和区域化的基础上, 采用调控型方法, 重点探讨了利用 MODIS 数据反演的地表蒸散在大范围内估算土壤水分平衡过程中的参数或变量初始值, 以实现水分胁迫条件下作物模型区域模拟的可行性。2002 年模拟结果显示, 引入遥感信息优化获得初始土壤有效含水量、返青期生物量及抽穗期灌溉量后, 土壤水分的模拟效果得到改善; 32 个农业气象试验站点模拟产量的相对均方根误差 (RRMSE) 由 0.63 降至 0.20; 华北冬小麦模拟产量的空间分布与实际产量分布更加接近, 产量低估的情况得到较好改善; 河北、河南、山东 3 省平均产量的模拟误差分别为 -4.9%、4.3% 和 8.6%。初步结果表明, 结合卫星遥感信息通过优化方法在大范围内估算作物模型的相关参变量, 以实现水分胁迫条件下作物模型的区域应用是行之有效的。

关键词: 作物生长模拟模型; 遥感信息; 华北冬小麦; 水分胁迫

Winter Wheat Growth Simulation under Water Stress by Remote Sensing in North China

ZHANG Li¹, WANG Shi-Li^{1,*}, HE Yan-Bo², MA Yu-Ping¹, ZHUANG Li-Wei², and HOU Ying-Yu²

(¹ Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081; ² National Meteorological Centre, Beijing 100081, China)

Abstract: Accurate crop growth monitoring and yield forecasting are significant to food security and sustainable development of agriculture. However, regional crop growth simulation under water stress faces the difficulties in determining the spatial distribution of some model parameters and initial conditions, such as initial available soil water and irrigation. It appears to be a big potential in this field to couple remote sensing data with crop model. In this paper, we proposed a way of combining evapotranspiration derived from satellite remote sensing data with crop growth simulation model (WOFOST) under water stress. Some modifications of WOFOST model were performed with field experimental data to make it applicable in North China Plain. The combination method was first applied to simulate the growth, development, and yield formation processes for winter wheat at two sites, Tai'an and Zhengzhou, during the growing season from 2001 to 2002. According to the results of sensitivity analysis, the initial available soil water was chosen to be recalibrated by observed evapotranspiration derived from MODIS data based on SEBS model (Surface Energy Balance System). Also the biomass at reviving and irrigation at heading stage were selected to re-estimated by observed SAVI and evapotranspiration, considering over-winter process and the importance of irrigation on winter wheat yield formation in North China. The difference between observed and simulated evapotranspiration/SAVI was minimized by re-initializing/re-parameterizing three chosen initial conditions/parameters with an optimization program (FSEOPT). The estimated values of initial available soil water and irrigation showed good agreement with observations at the two sites. And the relative errors of simulated dry matter weight of gross above-ground and storage organ were reduced also. On the basis of the regionalization of weather data, model parameters, and initial conditions, we used this method to estimate winter wheat yields in North China during the growing season from 2001 to 2002 at the scale of 0.25 degrees, especially for Henan, Hebei, and Shandong provinces. It was showed that both soil water estimates and final winter wheat production estimates were consistent with ground measurements since the initial available soil water, biomass at reviving and irrigation at heading stage were recalibrated by remote sensing data. The relative root mean square error (RRMSE) decreased from 0.63 to 0.20 for the yield from 32 experimental sites, which distribute uniformly in North China Plain. Also the aggregated yields for three provinces were improved, with relative errors -4.9%, 4.5%, and 8.6%, respectively. These results illustrated that the evapotranspiration derived from MODIS

*基金项目: 国家自然科学基金项目(40275035)

作者简介: 张黎(1982-), 女, 硕士。E-mail: onlynoopy@163.com

* 通讯作者 (Corresponding author): 王石立, 研究员。E-mail: wangsl@cma.gov.cn

Received (收稿日期): 2006-04-17; Accepted (接受日期): 2006-07-10.

data could be used to improve the winter wheat yield estimate under water stress on a regional scale. Further study should focus on better understanding of processes, error accumulation, and improvement on validation of both evapotranspiration derived from MODIS data and simulated yields for winter wheat.

Keywords: Crop growth simulation model; Remote sensing data; Winter wheat in North China; Water stress

及时、准确地预测大范围内农作物长势和产量对于指导农业生产、保障粮食安全具有十分重要的意义。卫星遥感信息与作物生长模拟模型结合既能提供宏观监测信息,又可动态反映作物生长发育过程,正受到广泛关注^[1-3]。目前已有一些以水分胁迫条件下作物生长模拟模型为基础,结合遥感信息进行区域尺度作物生长模拟的研究^[4-8],其方法主要有强迫型和调控型两种^[9-11]。强迫型直接利用遥感反演的冠层温度估算作物水分胁迫系数^[12-13],受遥感数据的时间分辨率、云覆盖等因素限制,大范围逐日模拟有一定难度。调控型大多利用遥感反演的叶面积指数(LAI)或植被指数,对作物模型的参变量进行重新初始化/参数化,以降低作物模型的不确定性^[14-18]。鉴于地表蒸散在优化土壤水分平衡计算、改进区域作物生长模拟中的重要作用及遥感估算大范围地表蒸散机理模型的建立和应用^[19-26],利用遥感反演的地表蒸散对作物模型土壤水分平衡子模型进行重新初始化/参数化,使估算相关参变量的区域分布成为可能,将有助于提高作物模型模拟水分胁迫条件下区域作物生长过程的能力。目前这方面的研究还不多见,而且仅在田间尺度进行过探讨^[27],尚未应用于区域。

潜在生产水平下作物模型与遥感信息的结合研究^[28]利用MODIS数据合成的土壤调节植被指数(SAVI)对区域上出苗日期、返青期生物量重新初始化,模拟水分较适宜年份的区域冬小麦生长过程取得较好效果。以此为基础,本文对国外作物模型进行本地化和区域化,采用调控型方法,重点探讨利用遥感反演的地表蒸散在区域尺度估算作物模型土壤水分平衡过程的相关参变量,从而实现大范围水分胁迫条件下作物生长模拟的方法和可行性。

1 材料和方法

1.1 研究区域及数据

在33~41°N、111~123°E之间的华北平原冬小麦主产区(河北、山东、河南3省),利用遥感数据进行土地分类,提取冬小麦种植区。该区小麦生育期内大于0℃积温为2000~2200℃,降水150~350mm左右,缺水50~200mm,返青至灌浆期缺水尤为严重^[29]。尽管灌溉面积占耕地面积44.6%以上,但

水资源短缺、农业用水不足、灌溉效率较低,农业干旱频频发生。

研究数据包括华北冬麦区气象、土壤、作物和遥感数据。收集了华北地区基本气象台站(80站)1971—2003年历年逐日最高温度、最低温度、总辐射(或日照时数)、降水量、水汽压、风速等气象要素数据。土壤数据源自华北农业气象观测站的土壤水文常数(0~50cm)、AB报土壤相对湿度和中国土壤质地图^[30]。

作物数据主要有华北地区冬小麦农业气象观测AB报数据、田间试验数据和产量数据。AB报数据包括华北一级农业气象观测站(48站)1991—2003年历年品种、发育期、生长状况等实测数据。田间试验数据为河北固城、山东泰安、河南郑州多年不同播期和水分处理的发育期、生物量和土壤水分观测数据。水分处理分为干旱、轻度干旱、水分适宜和偏多4种情况,土壤相对湿度分别控制在<40%、40%~60%、60%~80%和>80%。产量数据为2002年华北农业气象观测站(32站)的冬小麦实测产量及统计部门公布的上述3省各县冬小麦产量。

遥感数据包括2001—2002年冬小麦生长季内14次MODIS数据(DOY分别为324、66、71、78、92、98、101、108、111、114、121、142、144和146)。经过辐射定标、Botie效应校正、辐射校正和几何校正等预处理,得到红光(620~670nm)和近红外(841~876nm)波段地表反射率,用以合成SAVI。地表蒸散由SEBS模型(Surface Energy Balance System)^[31]利用MODIS标准产品(地表反照率、地表冠层温度、植被指数等)进行估算^[32]。遥感数据与作物模型的空间尺度匹配方法采用文献[28]的研究结果。

1.2 WOFOST模型的本地化和区域化

以荷兰作物模型WOFOST 7.1(World Food Studies Crop Growth Model)^[33]为研究工具。该模型依据欧洲气候特征、土壤质地、作物种类及品种而建立。欧洲与我国华北地区在气候、土壤、作物等方面均存在较大差异,因此引进时首先要进行WOFOST的本地化研究。潜在生产水平下WOFOST模型的移植、改造已较好地解决了冬小麦越冬至返青过程模拟、越冬过程中生物量损耗以及灌浆后期干物质转移和一些基本作物参数的修正等问题^[28,34]。本研究

进一步结合前人相关研究^[35-40]和田间观测资料,分别以河北固城、山东泰安和河南郑州为不同气候生态区的代表站点,选择不同水分控制试验下的田间试验数据进行水分胁迫条件下 WOFOST 模型部分过程和参数的调整和验证。采用 FAO 最新推荐的 Penman-Monteith 公式^[35]替换原模型中的 Penman 公式^[31],提高参考作物蒸散估算的精度。修改原模型作物生育期内作物系数为常数的做法,利用实测资料确定随生育期变化的作物系数,更好地估算农田最大蒸散量。改进 WOFOST 模型水分胁迫订正方法,用相对蒸腾的 10 d 滑动平均作为水分胁迫系数以反映水分胁迫对干物质生产影响的滞后性。同时针对水分胁迫发生时冬小麦比叶面积降低的状况,用相对蒸腾修正比叶面积,改善水分胁迫条件下 LAI 的模拟效果。改进后的 WOFOST 模型模拟根区土壤含水量的平均相对误差由先前的 11.6% 降至 7.6%,模拟值与实测值回归线的 R^2 由 0.8591 增为 0.8824。LAI 和地上总生物量的模拟效果也得到改善,二者模拟值与实测值回归方程中斜率、截距与 1、0 的差异均达到 0.05 显著水平,基本可用于模拟我国华北实际土壤水分状况下冬小麦生长发育及产量形成过程。

单点作物模型的区域应用建立在气象驱动变量、模型参数和初始条件的区域化基础上。利用考虑经纬度方向的距离权重反比法(inverse distance weight ing)进行空间插值获得经纬网格距为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的逐日气象要素。作物参数的区域划分采用潜在水平的研究结果^[34]。根据水分胁迫条件下作

物生长模拟的需要,将中国土壤质地图数字化后转换成 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的栅格数据,依据各网格点的土壤质地,通过计算^[41]和查阅文献^[42]等方法获得所需土壤参数(土壤水文常数、土壤物理参数等)的空间分布。利用华北 48 个农业气象观测站近 10 年平均出苗日期的空间插值结果作为各网格点模拟年份的出苗日期,并根据各地小麦足墒播种的假设取冬小麦最大有效根层(125 cm)的初始土壤相对含水量为 70%。

1.3 遥感信息与作物模型的结合

基于本地化和区域化的 WOFOST 模型,采用调控型方法,借助 FSEOPT 优化程序^[43]对作物模型的某些参数或变量初始值进行重新初始化/参数化,在模拟的地表蒸散 ET_s (或 $SAVI_s$)与遥感反演地表蒸散 ET_o (或 $SAVI_o$)的差异最小时获得相关参变量的最优估计值,再输入作物模型模拟冬小麦生长过程(图 1)。经敏感性分析发现,地上总生物量、LAI 和冠层蒸散对初始土壤有效含水量比较敏感。而初始土壤有效含水量的时空变异显著,常规手段难以获得。灌溉量是华北土壤水分平衡计算中必须考虑的重要分量,且区域上灌溉情况很难获得。因此,选择初始土壤有效含水量和需水关键期(抽穗期)灌溉量作为遥感反演地表蒸散优化的对象。考虑到华北冬小麦越冬期间生物量变化的情况,在优化抽穗期灌溉量之前,与潜在水平^[34]类似,选取返青期生物量为遥感合成 SAV 进行重新初始化的对象。依据先验知识确定上述参变量的取值范围(表 1)。

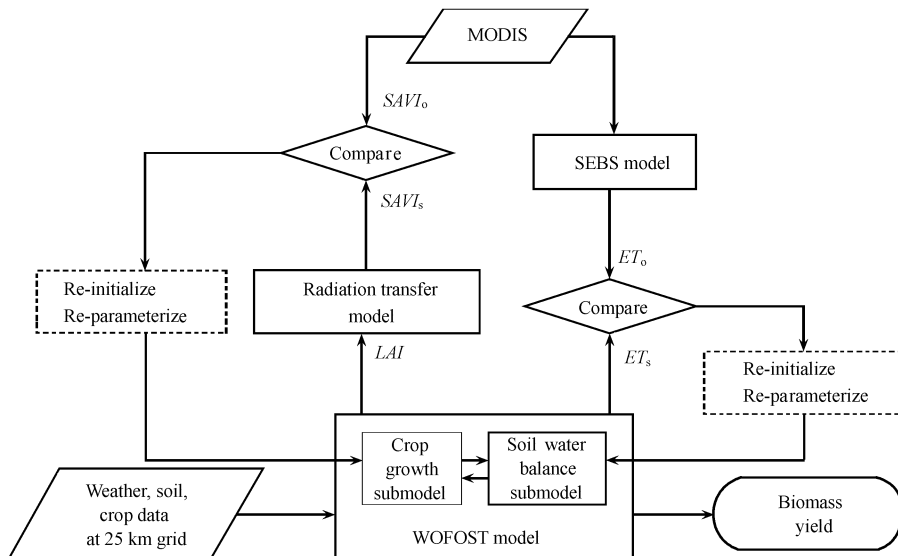


图 1 水分胁迫条件下区域遥感信息与作物模型结合的技术框图

Fig. 1 Flowchart of combined remote sensing data with crop model at water limited production level at regional scale

表1 待优化参数的定义及其取值范围

Table 1 Description and range of parameters and initial conditions during optimization

待优化参变量 Parameter and initial condition	定义 Description	取值范围 Range
WAV (mm)	初始土壤有效含水量 Initial available soil water	100-300
TDWIRE (kg hm ⁻²)	返青期生物量 Biomass at reviving	100 5-2300
IR (mm)	抽穗期灌溉量 Irrigation at heading stage	0-500

以泰安和郑州两站 2001—2002 年度冬小麦生长为例,首先在田间尺度探讨利用遥感信息优化作物模型相关参变量的方法,并用站点实测数据对优化结果进行检验;然后在气象要素空间插值及作物参数、土壤参数区域划分的基础上,通过优化方法估算区域各网格点的相关参变量,进行水分胁迫条件下的华北冬小麦生长模拟,同时给出区域模拟结果

表2 模型参变量的初始取值、最优估计及实测值

Table 2 Initial values, best estimates and observations of parameters and initial conditions

变量 Variable	山东泰安 Tai'an, Shandong			河南郑州 Zhengzhou, Henan		
	初始取值 Initial value	估计值 Estimate	实测值 observation	初始取值 Initial value	估计值 Estimate	实测值 Observation
WAV (mm)	198	226	215	168	256	233
TDWIRE (kg hm ⁻²)	1218.5	1401.2	—	2069.2	1001.5	—
IR (mm)	0.0	56.1	60.0	—	—	—

进一步将优化获得的初始土壤有效含水量、返青期生物量和抽穗期灌溉量输入作物模型,模拟冬小麦生长过程。比较模拟和实测值可以看出(图2),优化后地上总生物量和穗重的模拟结果得到改进,较好地体现了冬小麦生长后期的生物量累积过程。第144日地上总生物量模拟值的相对误差由-11.3%降到-1.9%,穗重模拟值的相对误差也由-7.1%降到-0.6%。*LAI*的模拟效果较好,优化影响不很明显。

用类似方法对郑州麦田的根区初始土壤有效含水量和返青期生物量进行了优化。该年度冬小麦生长季内获得的遥感地表蒸散数据有限(DOY为324、98和108),且均在实际抽穗期前获得,故未能对抽穗期灌溉量进行估算。初始土壤有效含水量的最优估计值为256 mm,与实测233 mm较为相符。优化估算的返青期生物量为1001.5 kg hm⁻²,低于未引入遥感信息时的模拟值,*LAI*模拟值也偏低(图2f),但模拟的冬小麦地上总生物量和穗重较未引入遥感信息时更接近实测结果(图2d, e),第136日二者的相对误差分别由-43.2%、-85.3%降低到2.7%、-15.0%。然而由于未考虑灌溉,优化后模

拟的初步验证。

2 结果与分析

2.1 田间尺度遥感信息与水分胁迫条件下作物模型的结合

利用遥感反演的地表蒸散数据(DOY为66、71、78)对泰安麦田根区的初始土壤有效含水量进行优化,得到最优估计值226 mm(表2),相对误差约5.1%。在此基础上,分别利用遥感合成SAVI(DOY为324、66、71、78、92和98)和反演的地表蒸散数据(DOY为92、108和121)优化获得返青期生物量和抽穗期灌溉量的估计值,依次为1401.2 kg hm⁻²、56.1 mm(表2)。估算的灌溉量与实际灌溉60 mm较为相符。

拟的水分胁迫情况较实际严重,导致穗重和*LAI*模拟值与实测值有一定偏差。

上述田间尺度的模拟结果表明,利用遥感反演的地表蒸散估算的作物模型相关参变量与实际情况较为一致,改善了冬小麦生长的模拟效果,为区域尺度遥感信息与水分胁迫条件下作物模型的结合奠定了基础。

2.2 区域尺度遥感信息与水分胁迫条件下作物模型的结合

与田间尺度研究类似,利用2001—2002年度华北冬小麦生长前期遥感反演的地表蒸散,通过优化方法获得区域各网格点初始土壤有效含水量的估计值;借助遥感合成的SAVI对返青期生物量进行重新初始化;利用冬小麦生长后期遥感反演的地表蒸散优化得到区域上的抽穗期灌溉量,最终模拟该年度华北平原水分胁迫水平下冬小麦生长发育及产量形成过程。

2.2.1 利用遥感信息优化初始土壤有效含水量
图3-a为各网格点初始土壤相对含水量为70%时计算的初始土壤有效含水量。与AB报提供的实测土壤水分(图3-c)相比,二者的空间分布存在明显差

异。利用遥感反演的地表蒸散估算的初始土壤有效含水量, 高值区位于 35~ 38°N、114~ 117°E 河北、山东和河南 3 省交界地区, 约 250~ 260 mm 左右; 低值区位于河北北部和河南西部等地, 大约在 200 mm 左右(图 3-b), 与实测土壤水分分布基本一致。这说明利用遥感反演的地表蒸散估算的初始土壤有效含水量, 能较好反映大范围土壤水分初始状况, 是准确模拟区域尺度土壤水分连续变化的重要前提。

2.2.2 利用遥感信息优化返青期生物量 用 2002 年返青至拔节期间遥感合成的 SAVI 对返青期生物量进行优化的结果(图 4-b) 显示, 华北冬麦区大部返青期生物量的估计值均低于优化前(图 4-a), 河南南部部分地区返青期生物量略有增加, 较好地反映了越冬期间华北冬麦区北部生物量损耗、南部缓慢生长的现象, 与我国华北冬季气候特点及冬小麦

生产实践非常吻合。可见, 遥感信息的引入可以改善区域上返青期生物量的模拟效果。

返青期生物量模拟的准确与否不仅直接影响后期冬小麦生物量的估算, 而且间接作用于返青后一段时间内土壤水分状况的模拟。图 5 为模拟的第 98 日(拔节期) 土壤相对湿度。可以看出, 优化后模拟的土壤相对湿度在华北大部分地区均高于未优化时的模拟值。这可能是优化估算的返青期生物量低, 麦田耗水量小所致。从优化后模拟的土壤相对湿度分布(图 5-b) 看, 研究区域内山东中部及半岛等地土壤相对湿度低于 60%, 有旱情存在。对照 2002 年 4 月上旬全国农业气象旬报“山东中部及半岛、河南部分麦区降水量不足 10 mm, 旱情依然存在”的记载, 优化后的模拟结果与之基本吻合。

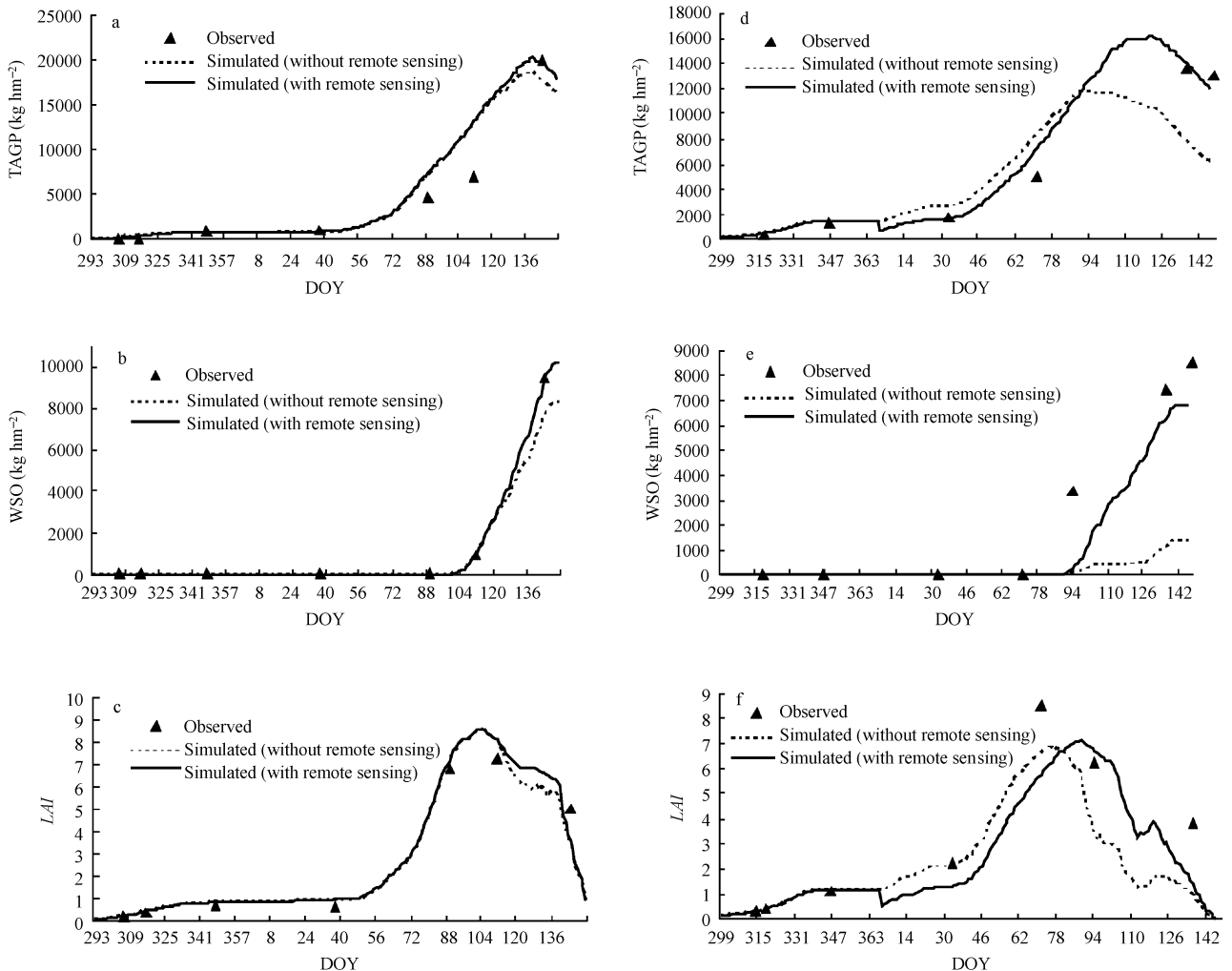


图 2 2002 年模拟的地上总生物量(TAGP)、穗重(WSO)及 LAI 与实测的比较
 Fig. 2 Simulated dry matter weights of gross above ground (TAGP) and storage organ(WSO), and LAI compared with observed values in 2002

a, b, c: 山东泰安; d, e, f: 河南郑州。a, b, c: Tai'an, Shandong; d, e, f: Zhengzhou, Henan.

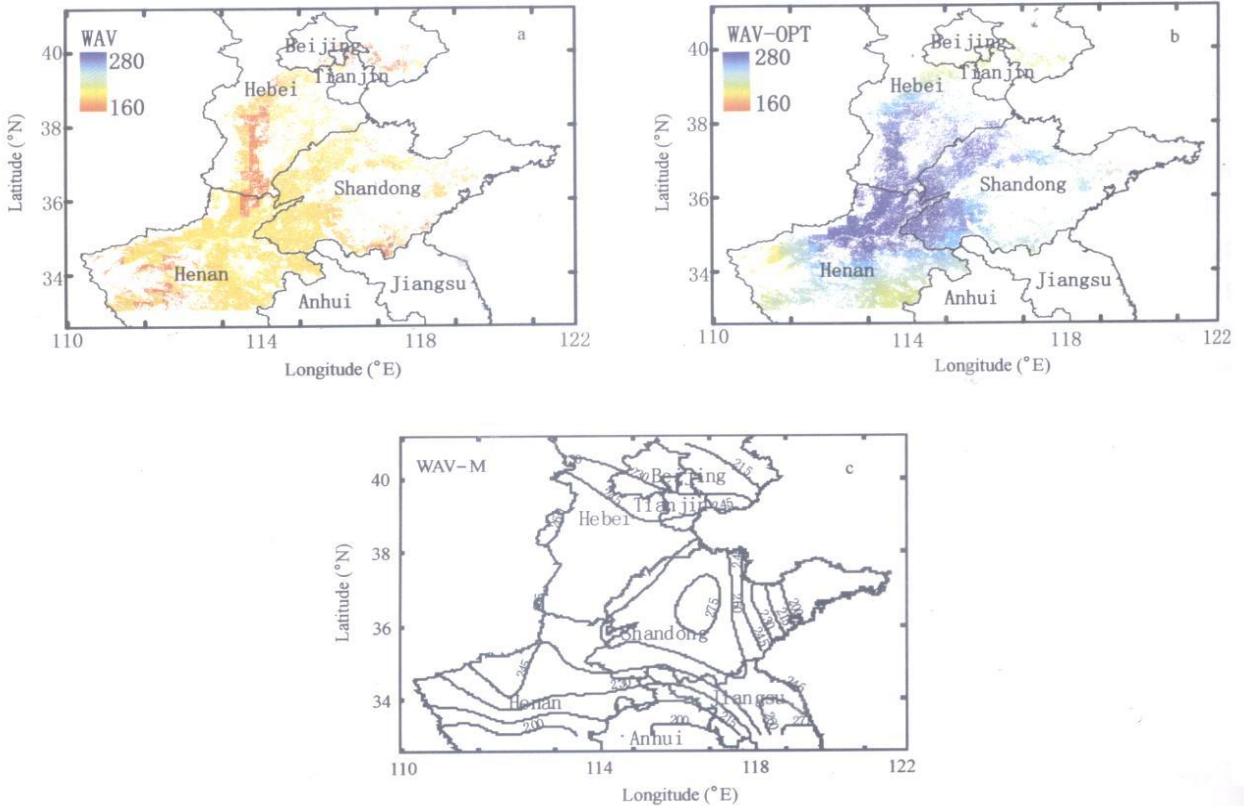


图3 2002年华北冬麦区初始有效土壤含水量的模拟与实测结果

Fig 3 Simulated and observed initial available soil water in North China Winter Wheat Region in 2002 (mm)

a: 土壤相对湿度为70%时的初始土壤有效含水量; b: 利用遥感反演的地表蒸散优化获得的初始土壤有效含水量; c: 出苗所在旬的实际初始土壤有效含水量。

a: Initial available soil water with 70% relative soil moisture; b: Initial available soil water reinitialized by evapotranspiration retrieved from remote sensing; c: Observed initial available soil water at a period of ten days in emergence stage

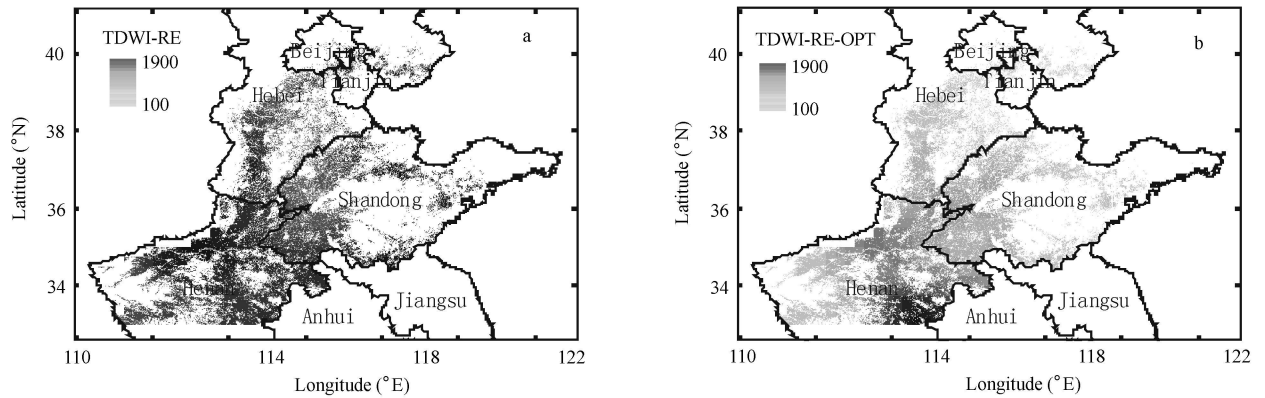


图4 2002年华北冬小麦返青期生物量的模拟与优化结果

Fig 4 Simulated biomass of winter wheat at reviving in North China Winter Wheat Region in 2002 (kg hm⁻²)

a: WOFOST 模型模拟的返青期生物量; b: 利用遥感合成的 SAVI 优化得到的返青期生物量。
a: Simulated biomass at reviving by WOFOST; b: Biomass at reviving recalibrated by SAVI.

2.2.3 利用遥感信息优化抽穗期灌溉量及土壤水分模拟 利用冬小麦生长中后期获得的若干次遥

感反演的地表蒸散, 通过优化方法估算区域各网格点的抽穗期灌溉量。从图6模拟的2002年第128

日(开花灌浆期间)土壤相对湿度可以看出,当不考虑抽穗期灌溉量时,华北大部分地区土壤相对湿度模拟值在 60% 以下(图 6a);反之,仅有河南南部、河北北部、山东西北部和中部等地的土壤相对湿度低于 60%,表明有旱情存在(图 6b)。后者与 2002 年 5 月上旬河北、河南和山东省农业气象旬报记载

相一致,即河北东南部、河南北部、山东西北部和中部等地有不同程度旱情,其余地区旱情缓解或消除。由此可见,利用遥感信息优化获得抽穗期灌溉量后,土壤水分的模拟效果得到改善,土壤相对湿度低于 60% 的地区与实际受旱地区的分布更接近。

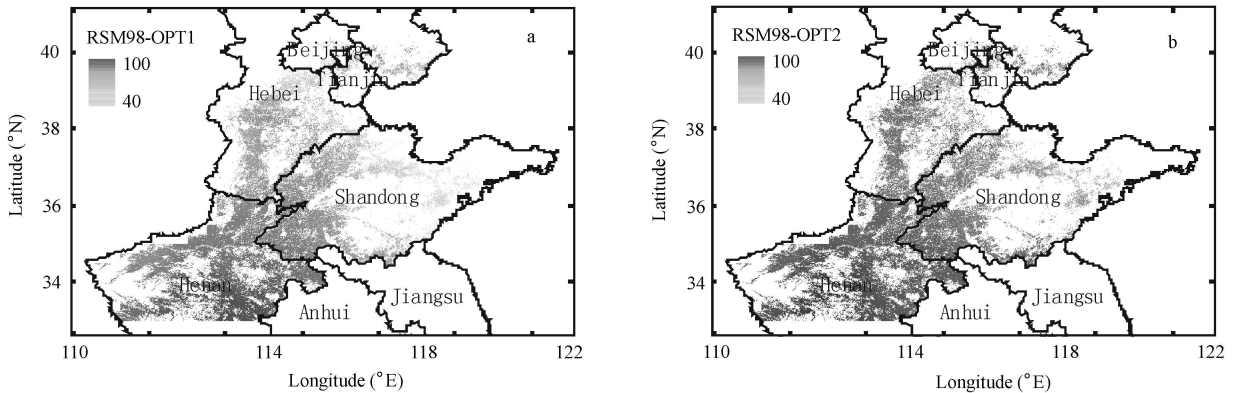


图 5 模拟的华北冬麦区 2002 年第 98 日根区土壤相对湿度

Fig. 5 Simulated relative soil moisture at root zone on DOY 98 in North China Winter Wheat Region in 2002(%

a: 仅优化初始土壤有效含水量后第 98 日模拟的土壤相对湿度; b: 优化初始土壤有效含水量及返青期生物量后第 98 日模拟的土壤相对湿度。

a: Only with the reinitialized initial available soil water; b: With the reinitialized initial available soil water and recalibrated biomass at reviving.

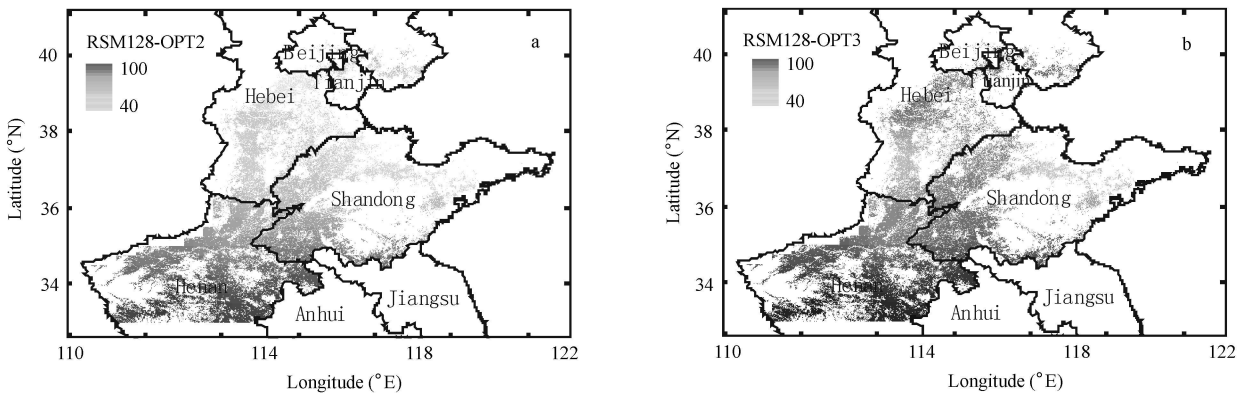


图 6 模拟的华北冬麦区 2002 年第 128 日根区土壤相对湿度

Fig. 6 Simulated relative soil moisture at root zone on DOY 128 in North China Winter Wheat Region in 2002(%

a: 优化初始土壤有效含水量及返青期生物量后第 128 日模拟的土壤相对湿度;

b: 优化初始土壤有效含水量、返青期生物量及抽穗期灌溉量后第 128 日模拟的土壤相对湿度。

a: With the reinitialized initial available soil water and recalibrated biomass at reviving;

b: With the reinitialized initial available soil water, recalibrated biomass at reviving and irrigation at heading stage.

2.3 引入遥感信息后的冬小麦产量模拟

引入遥感信息优化获得 2001—2002 年度华北麦区初始土壤有效含水量、返青期生物量和抽穗期灌溉量的估计值后,对该年度冬小麦生长过程进行模拟,得到区域各网格点的冬小麦穗干重,并依据田间观测数据将其折算为籽粒干重(单产)。利用均匀分布于 3 个省的 32 个农业气象观测站 2002 年冬小

麦实测产量资料对观测站所在网格点的模拟结果进行验证,比较引入遥感信息前后模拟产量与实际产量的差异(图 7)。引入遥感信息后,由于优化了初始土壤含水量,并考虑灌溉,模拟产量明显低估的情况得到较好改善,相对均方根误差(RRMSE)由 0.63 降至 0.20,且 F 检验结果表明模拟产量与实际产量二者差异不显著。

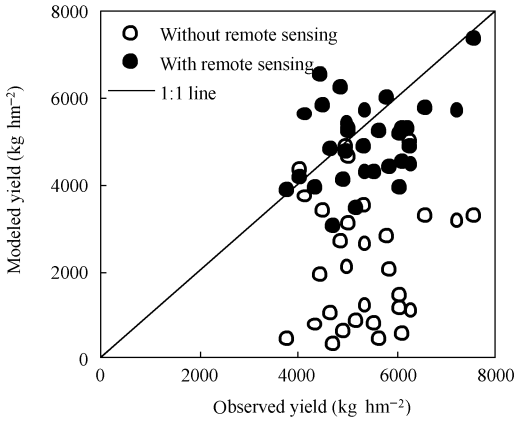


图7 模拟产量与实际产量的比较

Fig.7 Comparison of simulated and observed yield of winter wheat

区域模拟结果(图8-b)显示,大部分地区的模拟产量较引入遥感信息前(图8-a)均有所提高。河北南部、河南北部、东部及山东西部等地冬小麦模拟产量达4 500~ 55 00 kg hm⁻²,河北唐山、山东中部及半

岛等地约3 500~ 4 000 kg hm⁻²,与统计部门的实际产量分布(图8-c)大体一致。但在河北石家庄、河南西部等地模拟产量与实际情况仍有偏差。石家庄地区农业现代化水平高、水肥条件好,而本研究仅考虑了抽穗期一次灌溉,可能是导致模拟产量偏低的主要原因。河南西部山区有小麦插花种植,生产水平低下、土地瘠薄且径流量较大,造成实际产量水平低于仅考虑光热水气候条件的模拟产量。

进一步估算河北、河南和山东省冬小麦平均产量,分别为4 267、4 830和4 948 kg hm⁻²。对照2002年中国农业年鉴记载的该3省产量(4 488、4 630和4 554 kg hm⁻²),模拟的相对误差依次为- 4.9%、4.3%和8.6%。总体看来,依据遥感信息通过优化方法估算大范围初始土壤有效含水量、返青期生物量及抽穗期灌溉量,进行区域尺度水分胁迫条件下冬小麦生长过程模拟是可行的,优化后土壤水分和产量的模拟值更加接近实际情况。

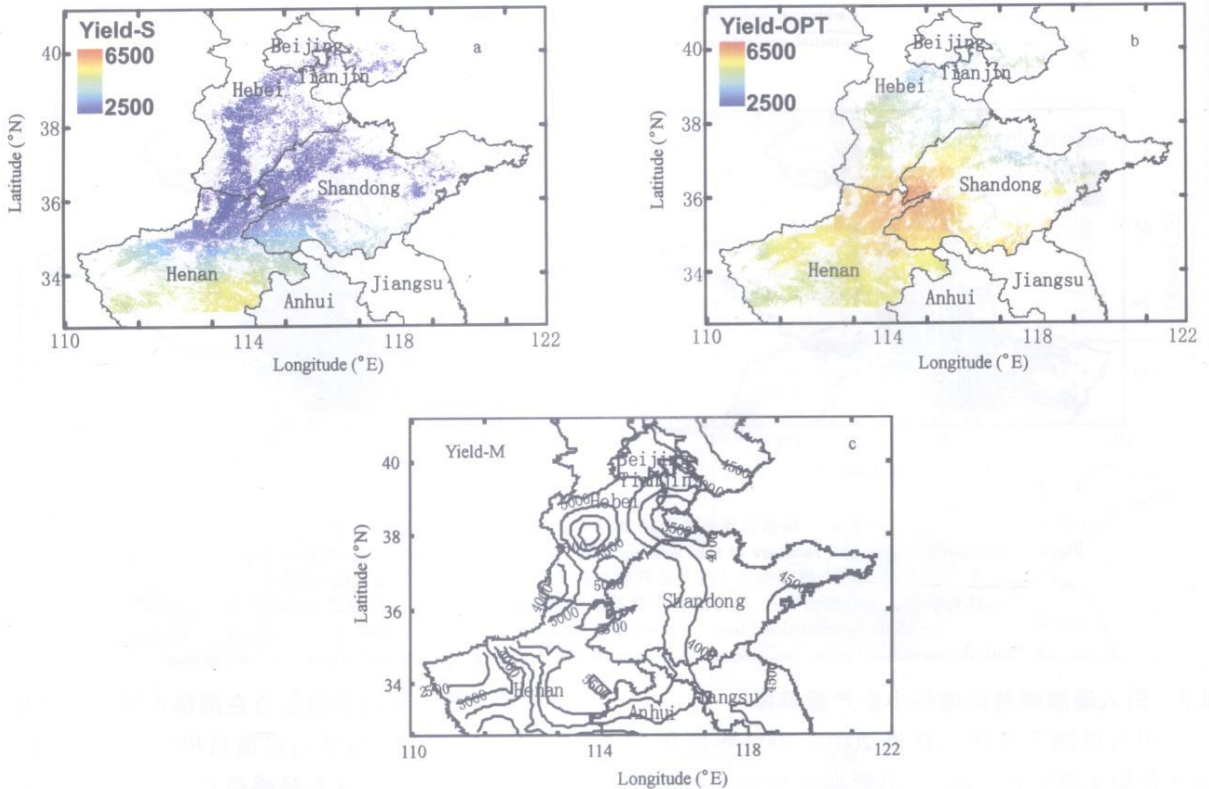


图8 2002年华北冬麦区冬小麦模拟产量及实测产量

Fig 8 Simulated winter wheat yields compared with statistical yields in North China Winter Wheat Region in 2002(kg hm⁻²)

a: 未引入遥感信息的模拟产量; b: 引入遥感信息后的模拟产量; c: 实际产量。
a: Without remote sensing data; b: With remote sensing data; c: Statistical yields.

3 讨论

3.1 我国华北冬麦区干旱发生频繁,灌溉条件各异,有限的水资源常常不能充分满足冬小麦生长的水分需求,对冬小麦产量形成有较大影响。而如何估算大范围的作物灌溉时间以及灌溉量仍是当前研究的难点。本文利用优化方法估计需水关键期灌溉量的做法,在一定程度上解决了华北实际水分状况下冬小麦生长模拟中悬而未决的灌溉量估算问题,提高了区域尺度麦田土壤水分及冬小麦产量的模拟效果。但对于实际灌溉条件较好的麦区,如河北石家庄地区,仅考虑抽穗期一次灌溉显然不足以反映当地实际灌溉水平。如何更好地体现实际灌溉情况还需继续研究。

3.2 本文在文献[28]研究基础上,利用 SAVI 对 2001—2002 年度华北冬麦区返青期生物量进行优化,较好地反映出华北大麦区越冬期间生物量损耗,华北南部微弱生长的现象,这与我国华北冬季气候特点及冬小麦生产实践较为吻合。研究中发现,由于 WOFOST 模型模拟的返青期 LAI 取决于返青期生物量,而 LAI 的模拟又作用于冠层蒸散,因此,返青期生物量模拟的准确与否不仅直接影响后期冬小麦生物量的估算,还对返青后一段时间的土壤水分状况模拟有间接作用。可见,返青期生物量在冬小麦生长发育及产量形成模拟过程中具有十分重要的地位。

3.3 本研究采用基于最小二乘原理的参数估计方法(FSEOPT 优化程序)进行遥感信息与作物模型相结合。只有当待优化参数的数目尽量少时才能获得满意的估计值。前人研究提出了各种待优化参数的选择方案^[8, 14, 44],其中与土壤水分平衡过程有关的参数有根生长率、最大根深等。本研究经参数敏感性分析发现,在水分胁迫条件下,初始土壤有效含水量比根生长率、最大根深等参数对冬小麦生物量模拟值的影响重要得多,而且其空间分布也具有更大的变异性。另外,考虑到越冬过程与灌溉对我国华北平原冬小麦生长及产量形成的重要影响,还选取了返青期生物量和抽穗期灌溉量作为待优化的对象。所以,在区域尺度开展遥感信息与作物模型结合研究时,必须针对特定的参数估计方法、作物模型特点以及参数特性等因素确定适宜的待优化参数。

3.4 由于涉及学科交叉和多个环节,本研究还需要进一步验证和完善。如遥感反演地表蒸散的验证工

作还有待增强,反演精度也有待提高;利用遥感数据提取的冬小麦种植区需通过田间调查进一步确认。另外,单点作物生长模型应用于区域尺度的时空变异及其不确定性、区域尺度作物产量模拟结果的检验等问题仍需深入探讨。

4 结论

利用遥感反演的地表蒸散,通过优化方法估算的初始土壤含水量与实际值较为吻合,返青期生物量得到一定程度调整,考虑灌溉后模拟的区域土壤水分与实际分布大体一致,从而使大范围水分胁迫条件下的冬小麦生长模拟得以实现,冬小麦产量模拟效果得到改善,32个农业气象试验站点模拟产量 RRMSE 约为 0.20,河北、河南、山东3省平均产量的模拟误差分别为-4.9%、4.3%和 8.6%。这表明应用遥感反演的地表蒸散改进作物模型,进行区域尺度水分胁迫条件下作物生长模拟是行之有效的。

致谢: 河南气象科学研究所、河北气象科学研究所、河北固城农业气象试验站、山东泰安农业气象试验站以及国家气象中心农业与生态气象室等单位提供了大量冬小麦试验及产量资料和农业气象 AB 报资料;范锦龙博士提供了华北平原冬小麦种植区域分布图。谨在此一并表示感谢!

References

- [1] Wiegand C L, Richardson A J, Kanemasu E T. Leaf area index estimates for wheat from LANDSAT and their implications for evapotranspiration and crop modeling. *Agron J*, 1979, 71: 336-342
- [2] Wiegand C L, Richardson A J, Jackson R D. Development of agronomic crop model inputs from remotely sensed information. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1986, 24(1): 90-98
- [3] Xin J F (辛景峰). Crop Growth Monitoring and Yield Estimation Based on 3S and Crop Modeling(基于 3S 技术与生长模型的作物长势监测与估产方法研究). PhD Dissertation of China Agricultural University, 2001. pp 72-86(in Chinese with English abstract)
- [4] Mass S J. Using satellite data to improve model estimates of crop yield. *Agron J*, 1988, 80: 655-662
- [5] Doraiswamy P C, Moulin S, Paul W C, Stern A. Crop yield assessment from remote sensing. *Photogram Eng Remote Sens*, 2003, 69: 665-674
- [6] Moulin S, Fischer A, Dedieu G, Delecoulle R. Temporal variations in satellite reflectances at field and regional scales compared with values simulated by linking crop growth and SAIL models. *Remote Sens Environ*, 1995, 54: 261-272
- [7] Jones D, Barnes E M. Fuzzy composite programming to combine remote sensing and crop models for decision support in precision crop management. *Agric Syst*, 2000, 65: 137-158
- [8] Moulin S, Launay M, Guerif M. The crop growth monitoring at a regional scale based on the combination of remote sensing and process-based models. In: Proceedings of International Symposium on Crop Monitoring and Prediction at Regional Scales. Tsukuba, Japan, 2001. pp 187-195

- [9] Mass S J. Use of remotely-sensed information in agricultural crop growth models. *Ecol Mod*, 1988, 41: 247-268
- [10] Moulin S, Bondeau A, Delecote R. Combining agricultural crop models and satellite observations: from field to regional scales. *Int J Remote Sens*, 1998, 19(6): 1021-1036
- [11] Fischer A, Kergoat L, Dedieu G. Coupling satellite data with vegetation functional models: review of different approaches and perspectives suggested by the assimilation strategy. *Remote Sens Rev*, 1997, 15: 283-303
- [12] Yu Z R (宇振荣), Driessen P M. Crop growth simulation and yield prediction based on the estimation of crop canopy temperature with remote sensing. *J Chin Agric Univ* (中国农业大学学报), 2003, 8 (suppl): 71-75 (in Chinese with English abstract)
- [13] Wang G-Z (王纯枝), Yu Z R (宇振荣), Xin J-F (辛景峰), Driessen P M, Liu Y-H (刘云慧). Yield gap estimation by combining remote sensing and crop growth model. *Trans CSAE* (农业工程学报), 2005, 21(7): 84-89 (in Chinese with English abstract)
- [14] Bouman B A M. Linking physical remote sensing models with crop growth simulation models, applied for sugar beet. *Int J Remote Sens*, 1992, 13(14): 2565-2581
- [15] Clevers J G P W, Buker C, van Leeuwen H J C, Bouman B A M. A framework for monitoring crop growth by combining directional and spectral remote sensing information. *Remote Sens Environ*, 1994, 50: 161-170
- [16] Clevers J G P W, van Leeuwen H J C. Combined use of optical and microwave remote sensing data for crop growth monitoring. *Remote Sens Environ*, 1996, 56: 42-51
- [17] Guenif M, Duke C. Calibration of the SUCROS emergence and early growth module for sugar beet using optical remote sensing data assimilation. *Eur J Agron*, 1998, 9: 127-136
- [18] Guenif M, Duke C L. Adjustment procedure of a crop model to the site specific characteristics of soil and crop using remote sensing data assimilation. *Agric Ecosyst Environ*, 2000, 81: 57-69
- [19] Kustas W P, Norman J M. Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces. *Hydrol Sci J*, 1996, 41(4): 495-516
- [20] Moran M S, Rahman A F, Washburne J C. Combining the Penman-Monteith equation with measurements of surface temperature and reflectance to estimate evaporation rates of semiarid grassland. *Agric For Meteorol*, 1996, 80: 87-109
- [21] Jiang L, Islam S. Methodology for estimation of surface evapotranspiration over large areas using remote sensing observations. *Geophys Res Lett*, 1999, 26(17): 2773-2776
- [22] Jiang L, Islam S. Estimation of surface evaporation map over southern Great Plains using remote sensing data. *Water Resour Res*, 2001, 37(2): 329-340
- [23] Zhang R-H (张仁华), Sun X-M (孙晓敏), Liu J-Y (刘纪远), Su H-P (苏红波), Zhu Z-L (朱治林), Tang X-Z (唐新斋). Regional differences of crop transpiration and soil moisture use efficiency from remote sensing. *Sci China (Ser D)* (中国科学·D辑), 2001, 31(11): 959-968 (in Chinese)
- [24] Su Z, Jacob A, Wen J, Roerink G J, He Y, Gao B, Boogaard H L, van Diepen C. Assessing relative soil moisture with remote sensing data: theory, experimental validation, and application to drought monitoring over the North China Plain. *Phys Chem Earth*, 2003, 28: 89-101
- [25] Jiang L, Islam S. An inter-comparison of regional latent heat flux estimation using remote sensing data. *Int J Remote Sens*, 2003, 24(11): 2221-2236
- [26] Norman J M, Anderson M C, Kustas W P, French A N, Mecikaski J, Torn R, Diak G R, Schmugge T J, Tanner B C W. Remote sensing of surface energy fluxes at 10³m pixel resolutions. *Water Resour Res*, 2003, 39(8): 1221
- [27] Moran M S, Mass S J, Pinter P J. Combining remote sensing and modeling for estimating surface evaporation and biomass production. *Remote Sens Rev*, 1995, 12: 335-353
- [28] Ma Y-P (马玉平), Wang S-L (王石立), Zhang L (张黎), Hou Y-Y (侯英雨), Zhuang L-W (庄立伟), Wang F-T (王馥棠). Study on winter wheat regional simulation model based on remote sensing data and its simulations in North China. *Acta Meteorol Sin* (气象学报), 2005, 63(2): 204-215 (in Chinese with English abstract)
- [29] Collaboration Group by Crop and Forest Climate Compartment in China (中国农林作物气候区划协作组). Crop and Forest Climate Ecologic Compartment in China (中国农林作物气候区划). Beijing: Meteorology Press, 1987. pp 28-30 (in Chinese)
- [30] Institute of Soil Science, China Academy of Sciences (中国科学院南京土壤研究所). The Soil Atlas of China (中国土壤图集). Beijing: SinMap Press, 1986 (in Chinese)
- [31] Su Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrol Earth Syst Sci*, 2002, 6(1): 85-99
- [32] He Y B, Su Z, Jia L, Zhang Y Y, Roerink G, Wang S L, Wen J, Hou Y Y. Estimation of daily evapotranspiration in northern china plain by using MODIS/TERRA Images. In: proceedings of SPIE Vol. 5976, 59761M, Brugge, Belgium, 2005
- [33] Supit A A, Hooijer C A, van Diepen System Description of the WOFOST 6.0 Crop Simulation Model Implemented in CGMS. Volume 1: theory and algorithms. EUR 15956, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 1994
- [34] Ma Y-P (马玉平), Wang S-L (王石立), Zhang L (张黎), Zhuang L-W (庄立伟). A preliminary study on a regional growth simulation model of winter wheat in North China based on scaling-up approach: I. Potential production level. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2005, 31(6): 697-705 (in Chinese with English abstract)
- [35] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration. FAO Irrigation and Drainage paper 56. Rome, 1998
- [36] Feng X-Z (冯秀藻), Tao B-Y (陶炳炎). Agrometeorology Theory (农业气象学原理). Beijing: Meteorology Press, 1991. pp 165-167 (in Chinese)
- [37] Wang S-L (王石立). Growth simulation model of winter wheat and its application in drought assessment. *J Appl Meteorol Sci* (应用气象学报), 1998, 9(1): 15-23 (in Chinese with English abstract)
- [38] Doorenbos J, Kassam A H. Yield response to water. Rome: FAO, 1979. pp 18-29 (in Chinese)
- [39] Liu G-M (刘昌明), Zhang X-Y (张喜英), You M-Z (由懋正). Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat field by large scale weighing lysimeter and micro lysimeter. *J Hydraulic Eng* (水利学报), 1998, 10: 36-39 (in Chinese with English abstract)
- [40] Gong Y-S (龚元石), Li Z-Z (李子忠), Li G-Y (李春友). Measurement of crop water requirements and crop coefficients using time domain reflectometry. *J Chin Agric Univ* (中国农业大学学报), 1998, 3(5): 61-67 (in Chinese with English abstract)
- [41] Driessen P M. The water balance of soil. In: van Keulen H, Wolf J eds. Modelling of Agricultural Production: Weather, Soils and Crops. Pudoc, Wageningen, Netherland, 1986. pp 76-116
- [42] Pennington de Vries FWT, Jansen D M, ten Berge H F M. Trans by Zhu D-F (朱德峰), Cheng S-H (程式华). Simulation of Ecophysiological Processes of Growth of Several Annual Crops (几种一年生作物生长的生态生理过程模拟). Beijing: China Agricultural Science-Tech Press, 1991 (in Chinese)
- [43] Sol W, Rouse D L, van Kraalingen D W G. FSEOPT a FORTRAN Program for Calibration and Uncertainty Analysis of Simulation Models. Wageningen Centre for Agrobiological Research (CABO-DLO) & Department of Theoretical Production Ecology, Agricultural University, 1992
- [44] Launay M, Guenif M. Assimilating remote sensing data into a crop model to improve predictive performance for spatial applications. *Agric Ecosyst Environ*, 2005, 111: 321-339